

Вспомогательный источник питания мощностью 60 Вт

на силовом SiC-ключе 1700 В

Ввиду простоты реализации и экономичности обратноходовые источники питания находят самое широкое применение в различных сегментах рынка. Однако при использовании в высоковольтных приложениях, например как вспомогательный источник питания с запиткой от высоковольтной промежуточной шины постоянного тока, разработчики сталкиваются с проблемой выбора соответствующего ключа. С этой целью компания Cree Inc. предложила использовать в роли силового ключа обратноходового преобразователя свои новые высоковольтные МОП-транзисторы на основе карбида кремния. Использование предлагаемых транзисторов в качестве классического решения одиночного силового ключа отодвигает границу применения преобразователей по входному напряжению до 1000 В и улучшает их общие характеристики, повышая их КПД, а уменьшенный уровень электромагнитных помех облегчает решение сложных вопросов электромагнитной совместимости.

Перевод:
Владимир Рентюк

Валерия Смирнова

cree@macrogroup.ru

Вступление

В трехфазных схемах электропитания (управление электроникой в электроприводе, источники бесперебойного питания, инверторы фотогальванических батарей) всегда имеется встроенный преобразователь напряжения переменного тока в постоянный (AC/DC) или постоянного в постоянный ток (DC/DC)

заданного уровня. Для поддержки должного функционирования таких систем им необходим дополнительный источник питания небольшой мощности, предназначенный для питания вентиляторов системы охлаждения, дисплеев, логики управления и систем защиты. Очень часто этот источник питается от шины постоянного тока до 1000 В. Популярная топология таких источников — обратноходовой преобразователь. При использовании одного силового транзистора в этой схеме его рабочее напряжение должно превышать входное напряжение.

Кремниевые МОП-транзисторы имеют блокирующее напряжение до 1500 В, что почти не дает запаса при шине 1000 В. Это негативно влияет на надежность источника питания в целом.

Еще одна проблема кремниевых транзисторов — высокое сопротивление канала в открытом состоянии, $R_{DS(on)}$. Это влечет за собой относительно высокие потери проводимости, что в результате ведет к еще большему нагреву и, соответственно, более низкому КПД источника. Особенно это заметно, когда вся трехфазная система работает при относительно малой выходной мощности и потери во вспомогательном источнике питания начинают играть заметную, а часто и основную роль в общих суммарных потерях всей системы преобразования энергии.

В статье приведено сравнение параметров схем преобразователей с кремниевыми транзисторами (рис. 1) с преобразователем на одном SiC МОП-транзисторе 1700 В с активной схемой пуска.

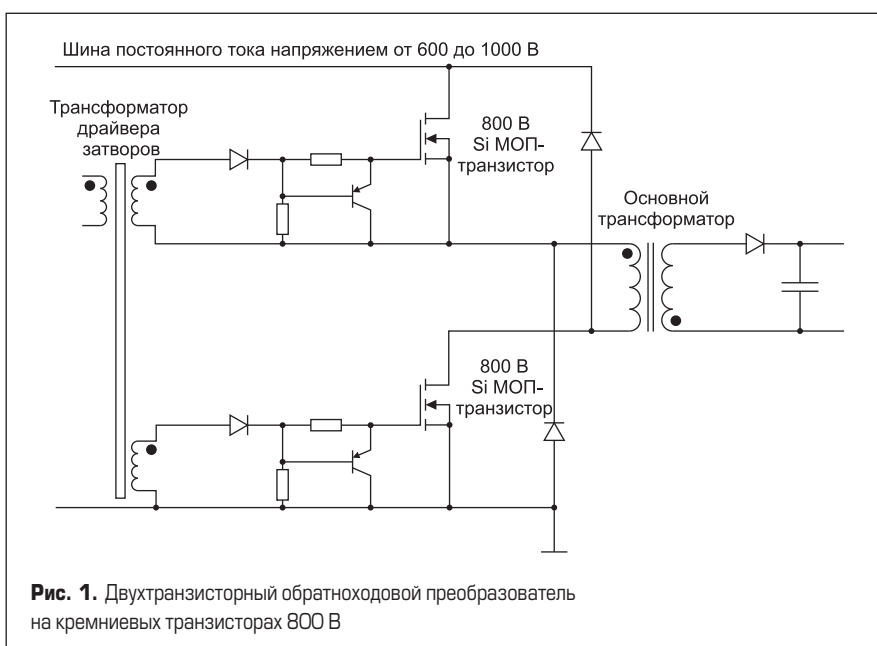


Рис. 1. Двухтранзисторный обратноходовой преобразователь на кремниевых транзисторах 800 В

Особенности SiC МОП-транзистора 1700 В компании Wolfspeed

Сегодня полупроводниковые устройства, выполненные на основе карбида кремния (SiC), характеризуются рядом уникальных и достаточно перспективных свойств, таких как высокие номинальные рабочие напряжения, низкие потери при переключении, малое сопротивление канала в открытом состоянии, более высокая допустимая рабочая температура и высокая радиационная стойкость. Представляемый в рамках настоящей статьи коммерчески доступный 1700-В SiC МОП-транзистор в корпусе TO-247 типа C2M1000170D от компании Wolfspeed предназначен для самого широкого применения в различных высоковольтных приложениях, в том числе и в качестве силового ключевого элемента во вспомогательных источниках питания с высокими входными напряжениями. В таблице 1 сравниваются основные параметры SiC и кремниевых МОП-транзисторов в идентичном исполнении в части корпусирования, в данном случае в корпусе типа TO-247.

Из приведенного в таблице 1 сравнения видно, что SiC МОП-транзистор может поддерживать гораздо более высокое блокирующее напряжение до 1700 В и имеет напряжение лавинного пробоя, превышающее 1800 В, тогда как кремниевый МОП-транзистор имеет блокирующее напряжение всего 1500 В с низким ненормированным значением напряжения лавинного пробоя.

Таблица 1. Сравнение основных параметров 1700-В карбид-кремниевых и 1500-В кремниевых МОП-транзисторов

Параметры	SiC МОП-транзистор C2M1000170D	Si МОП-транзистор STW4N150	Si МОП-транзистор 2SK2225DS
Максимальное напряжение сток-исток, V_{DSmax}	1700 В	1500 В	1500 В
Напряжение лавинного пробоя	Не менее 1800 В	Нет данных	Нет данных
Номинальный рабочий ток I_D при температуре $T_c = 25^\circ\text{C}$, А	5	4	2
Сопротивление канала в открытом состоянии $R_{DS(on)}$ при температуре $+15^\circ\text{C}$, Ом	2	5	20
Выходная емкость C_{oss} , пФ	12	120	60
Максимальная рабочая температура полупроводникового перехода $T_{j, max}$, $^\circ\text{C}$	Более +150	+150	
Корпус	TO-247-3	TO-220, TO-247, TO-3PF	TO-3PF

Что касается сопротивления канала в открытом состоянии и паразитной емкости, то и здесь SiC МОП-транзистор имеет лучшие показатели относительно его ближайшего кремниевого конкурента. Это гарантирует, что транзистор типа C2M1000170D имеет и малые потери проводимости, и низкие коммутационные потери при переключении. Данное ключевое отличие дает нам полную уверенность, что 1700-В SiC МОП-транзистор, заменяя 1500-В кремниевый МОП-транзистор, обеспечит не только высокую эффективность, но и более высокую надежность преобразователя.

Схема активного запуска

В предлагаемом решении для повышения КПД преобразователя и ускорения выхода

его на номинальные характеристики по напряжению и отдаваемой мощности была реализована активная схема запуска «без потерь». Альтернативой данному решению является резистивная схема, которая увеличивает время его запуска при низких уровнях входного напряжения.

Схема активного запуска показана на рис. 2. Когда входное напряжение увеличивается, транзистор Q6 включается по достижении порогового значения напряжения база-эмиттер V_{base} , которое устанавливается на его базе через последовательную цепочку из резисторов R31–R36. В этом случае напряжение питания V_{CC} через цепочку резисторов R22–R25 поступает на микросхему ШИМ-контроллера преобразователя U1 (здесь используется UCC28C44, [5]) и вклю-

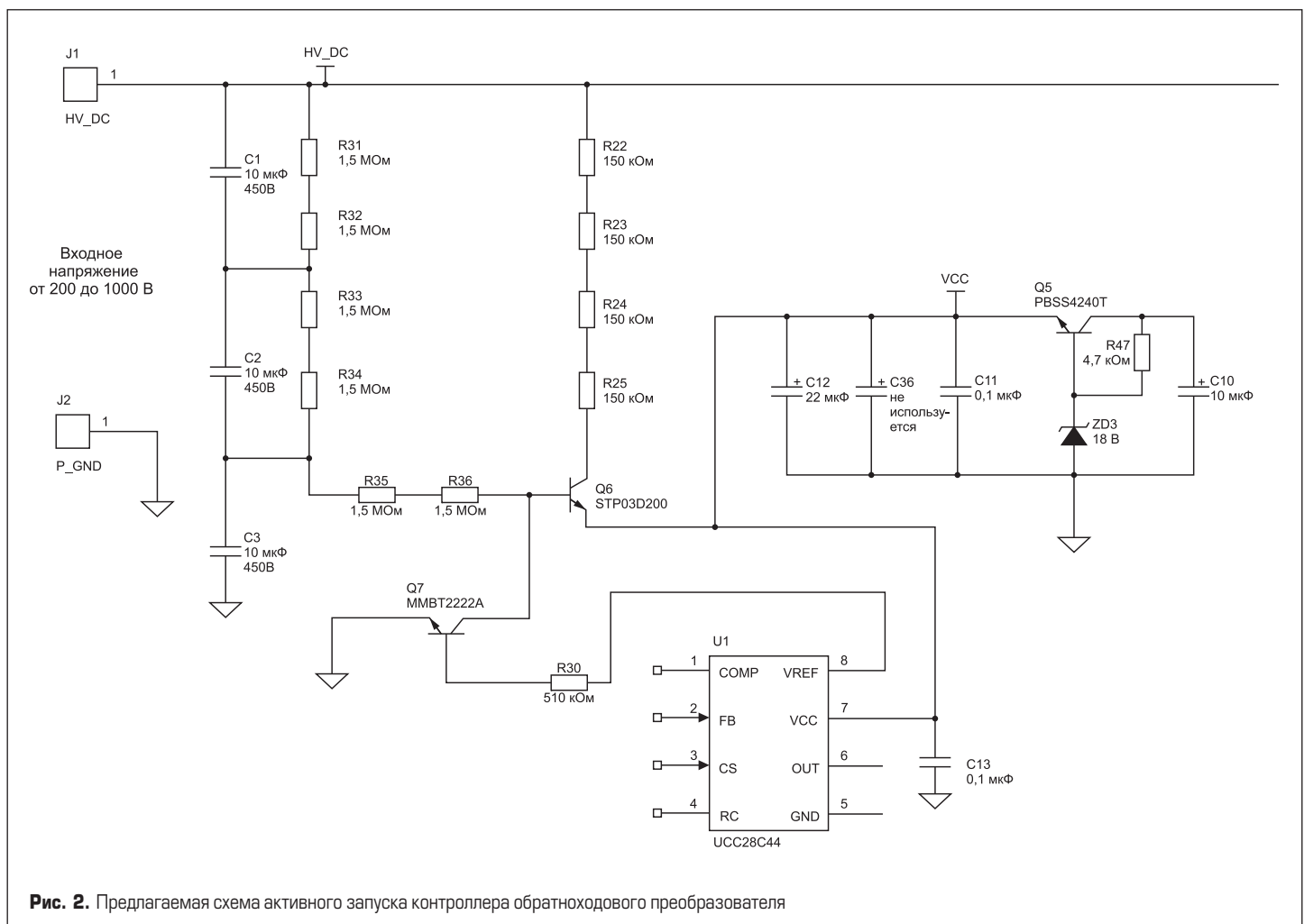


Рис. 2. Предлагаемая схема активного запуска контроллера обратноходового преобразователя

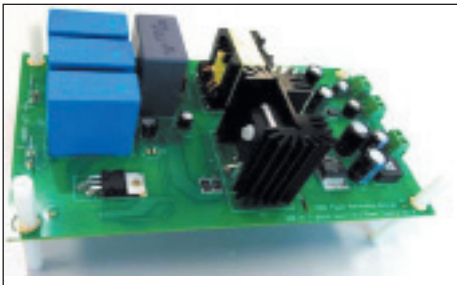


Рис. 3. Плата вспомогательного импульсного блока питания 60 Вт с использованием силового ключа 1700-В SiC МОП-транзистора и активной схемой запуска

чает ее. Когда U1 начинает функционировать, то напряжение питания V_{CC} поступает уже из вспомогательной обмотки силового трансформатора. В этом случае если напряжение питания V_{CC} достигает порога запуска U1, то напряжение на выходе V_{REF} микросхемы переходит на высокий уровень (+5 В), который открывает транзистор Q7. После чего транзистор Q6 запирается и отключает путь подачи пускового тока на выход питания V_{CC} . Резисторы R31–R36 выполняют еще и роль балансировочных, что необходимо для выравнивания напряжения на последовательно включенных входных конденсаторах C1–C3. С этой целью в качестве элементов балансировки напряжения используются резисторы R31–R36 с высоким номинальным значением сопротивления.

Как уже было сказано, через резисторы в цепи запуска R22–R25 питание на ШИМ-контроллер U1 подается до тех пор, пока выходное напряжение вспомогательного блока питания не повысится, тогда эта цепь будет отключена от входа V_{CC} микросхемы U1 и перейдет в режим штатной запитки от вспомогательной обмотки обратноходового трансформатора. Следовательно, данная цепочка более не участвует в работе преобразователя, ток через нее не подается, а значит, потери

на ней отсутствуют. Таким образом, активная схема запуска может уменьшить рассеивание мощности при запуске, особенно при высоком входном напряжении, и повысить КПД преобразователя. Дополнительная рассеиваемая мощность при установившихся нормальных условиях работы контроллера преобразователя обусловлена балансировочными сопротивлениями, но их можно выбрать достаточно высокими по номиналу, свыше 6 МОм. Еще более важно, что из-за низких значений сопротивления в цепи запуска (это можно реализовать для такой активной схемы) время пуска преобразователя и его выхода на рабочий режим будет коротким и может быть настроено так, чтобы соответствовать заданному целевому значению. Если задать минимальное время запуска, например равное 1 с, то емкость на входе питания V_{CC} можно рассчитать следующим образом:

$$C_{start-up} > \frac{I_{UCC28C44start-up} T_{start-up}}{V_{UVLO-on} - V_{UVLO-off}} \quad (1)$$

Из данных спецификации на ШИМ-контроллер UCC28C44 мы имеем типовое значение пускового тока $I_{UCC28C44start-up}$ не более 0,1мА; порог включения $V_{UVLO-on} = 14,5$ В; порог выключения $V_{UVLO-off} = 9$ В. Если учитывать, что рекомендованная емкость $C_{start-up}$ не должна быть менее 18 мкФ, то можно выбрать емкость по входу V_{CC} , равную 22 мкФ. Тогда общий пусковой ток рассчитывается с помощью следующего уравнения:

$$I_{start-up} = \frac{C_{start-up} V_{UVLO-on}}{T_{start-up}} = \frac{22 \text{ мкФ} \times 14,5 \text{ В}}{1 \text{ с}} = 0,319 \text{ мА} \quad (2)$$

Следовательно, общее сопротивление пусковых резисторов, то есть сумма значений сопротивлений резисторов R22–R25, может быть рассчитано как:

$$R_{start-up} = \frac{V_{DCmin} - V_{UVLO-off}}{I_{start-up}} = \frac{200 \text{ В} - 9 \text{ В}}{0,319 \text{ мА}} = 600 \text{ МОм} \quad (3)$$

Предполагая, что средний коэффициент усиления по току h_{FE} у 2-кВ транзистора STP03D200 [6] производства компании STMicroelectronics — по факту это сборка из двух транзисторов, включенных по схеме Дарлингтона, — равен 500 (согласно спецификации минимальный h_{FE} равен 200), то общее сопротивление цепочки резисторов R31–R36 ($R_{Balance}$) может быть рассчитано как:

$$R_{Balance} = \frac{V_{DCmin} - V_{UVLO-off}}{I_{start-up} / h_{FE}} = \frac{200 \text{ В} - 9 \text{ В}}{0,319 \text{ мА} / 500} < 300 \text{ МОм} \quad (4)$$

При использовании гораздо более высоких по номиналу резисторов суммарные потери на них, как это понятно, уже не оказывают заметного отрицательного влияния на общие потери преобразователя.

Результаты испытаний

Для демонстрации производительности блока питания с предлагаемым активным запуском представлена схема обратноходового преобразователя выходной мощностью 60 Вт с питанием от высоковольтной шины постоянного тока. Компания WolfSpeed разработала соответствующую демоплату CRD-060DD12P с SiC МОП-транзистором C2M1000170D на борту (рис. 3) [1]. Следует отметить, что эта плата не предназначена для промышленного использования и не может служить конечным продуктом.

Технические характеристики, описывающие данный преобразователь, приведены в таблице 2.

На рис. 4 приведены фактические результаты измерения КПД преобразователя при полной нагрузке при изменении его входного напряжения в пределах 200–1000 В. Для сравнения представлены данные при использовании в блоке питания трех типов полупроводниковых приборов, выполненных на базе Si и SiC. Как можно видеть, из-за свойственного 1700-В SiC МОП-транзисторам более низкого сопротивления канала в открытом состоянии и весьма низкой паразитной выходной емкости они по сравнению с конкурирующими 1500-В Si МОП-транзисторами достигают более высокой эффективности.

Таблица 2. Технические характеристики платы CRD-060DD12P

Входное напряжение постоянного тока, В	200–1000 В		
Выходное напряжение постоянного тока, В	12	5	–12
Выходной ток, А	4,5	0,5	0,25
Частота преобразования, кГц	75		
КПД, %	Не менее 83		

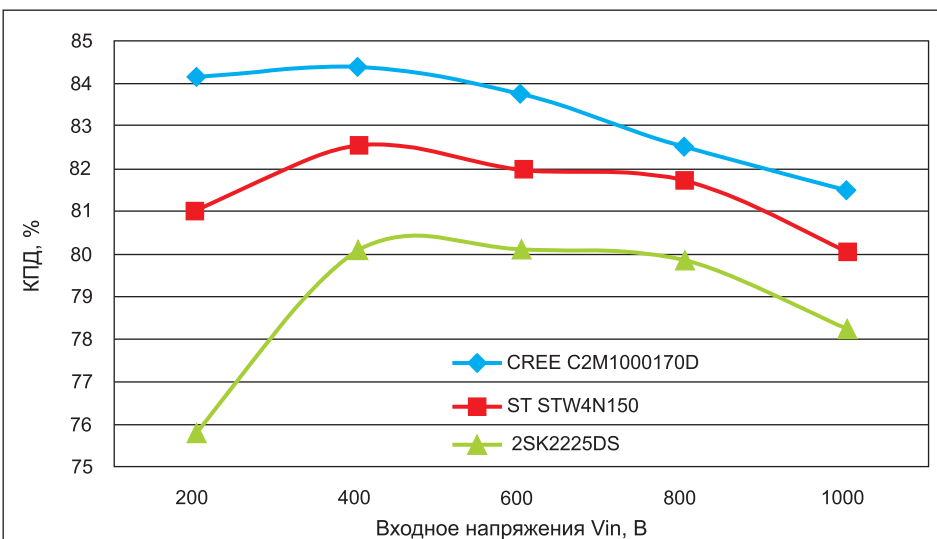
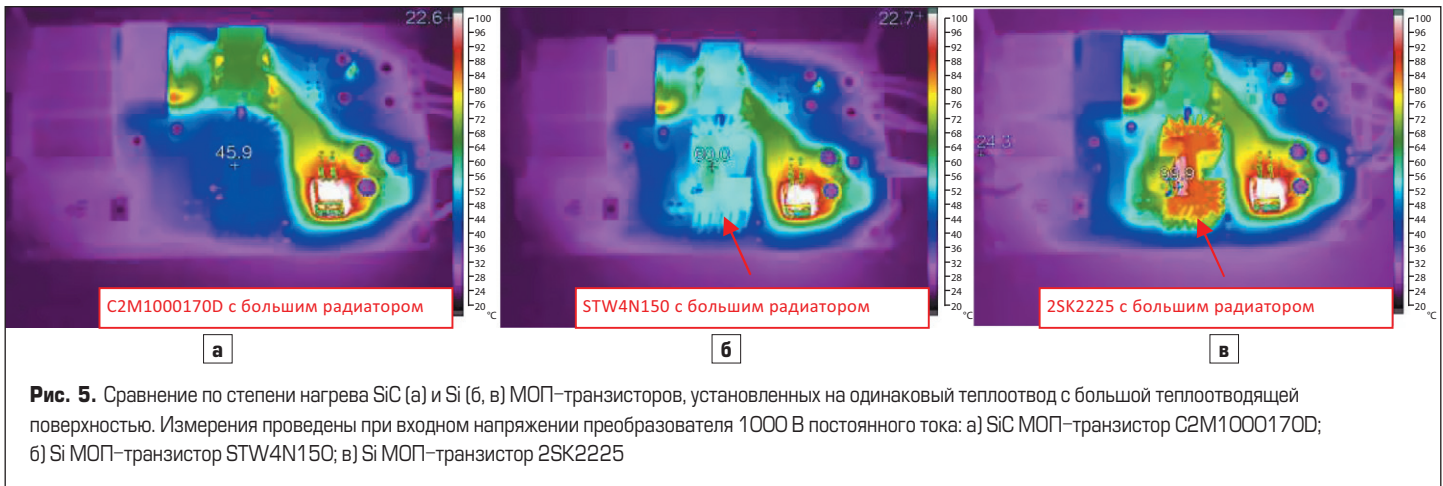


Рис. 4. Зависимость КПД 60-Вт вспомогательного импульсного блока питания с использованием в качестве силового ключа 1500-В Si и 1700-В SiC МОП-транзисторов от уровня входного напряжения при активной схеме запуска



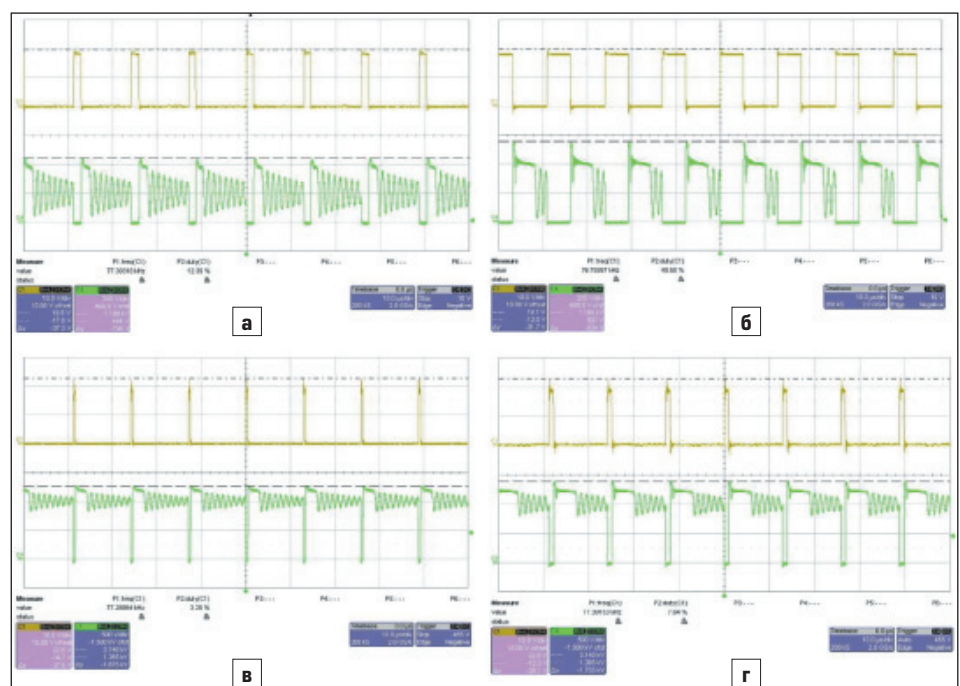
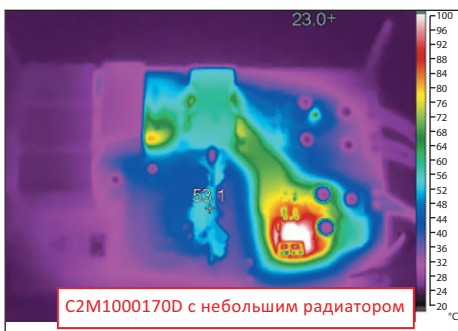
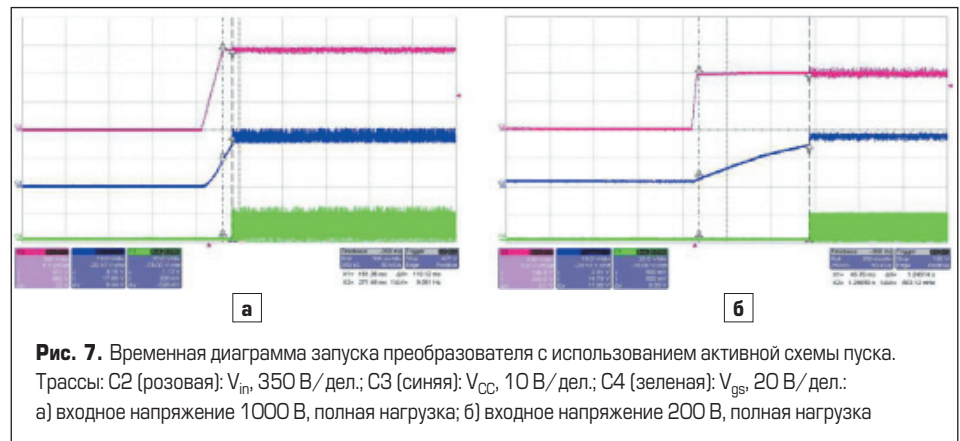
Что касается такого важного показателя, как тепловые характеристики, то при полной нагрузке с использованием одного и того же теплоотвода (рис. 5) SiC МОП-транзистор явно имеет гораздо более низкую рабочую температуру, а именно +45,9 °С. Для сравнения: конкурирующие с ним кремниевые 1500-В МОП-транзисторы дают нам +60 и +99,9 °С соответственно. Это свидетельствует о том, что 1700-В SiC МОП-транзистор может обеспечить в конечном приложении более высокую надежность. Кроме того, использование 1700-В SiC МОП-транзистора также позволяет применить небольшой недорогой теплоотвод, поскольку для него необходимо рассеивать меньшее количество тепла. Такое решение показано на рис. 6. Все сказанное в сумме поможет сэкономить на габаритах платы дополнительного источника питания и улучшить столь важный для современной аппаратуры показатель, как плотность мощности.

На рис. 7 показана форма напряжения при использовании предлагаемой активной схемы запуска. При входном напряжении 1000 В время запуска составляет менее 100 мс. При входном напряжении 200 В оно увеличивается, но и в этом случае не превышает 1 с. При необходимости, уменьшая суммарное сопротивление цепочки пусковых резисторов

R22–R25, без потери эффективности можно обеспечить более быстрое время пуска преобразователя.

На рис. 8 показаны формы напряжения V_{gs} (затвор-исток) и V_{ds} (сток-исток) при

различных входных напряжениях и нагрузке преобразователя (полная нагрузка и малая нагрузка). Можно видеть, что форма напряжения V_{gs} и V_{ds} для 1700-В SiC МОП-транзистора весьма чистая без суще-



ственного звона (паразитных затухающих высокочастотных гармонических переходных процессов при включении и выключении силового ключа), с быстрым переключением как при входном напряжении 200 В, так и 1000 В напряжения постоянного тока.

Полная схема вспомогательного источника питания приведена на рис. 9. Оригинальное описание, разводка печатной платы и перечень элементов доступны на сайте www.wolfspeed.com [7].

Литература

1. C2M1000170D Silicon Carbide Power MOSFET C2MTM MOSFET Technology N-Channel Enhancement Mode, Rev. E, 10-2015, Wolfspeed Inc. www.wolfspeed.com/c2m1000170d
2. Zhao J. B., Dai F. Z. Soft-switching two-switch flyback converter with wide range. Industrial Electronics and Application, 2008. ICIEA, 2008. www.ieeexplore.ieee.org/document/4582517/
3. Robert W., Dragan M. Fundamentals of Power Electronics. Boulder Colorado, 2002.
4. Dixon L. H. Magnetics Design for Switching Power Supplies. Unitrode Magnetics.
5. UCCx8C4x BiCMOS Low-Power Current-Mode PWM Controller datasheet, Rev. G. www.ti.com/lit/gpn/ucc28c44
6. DS5552: 2 kV NPN Darlington transistor. www.st.com/resource/en/datasheet/stp03d200.pdf
7. www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/175/product/0/60w_single_ended_fly_back_auxiliary_power_supply_reference_design.pdf